

## 1. INTRODUCCIÓN.

La máquina eléctrica de corriente continua es un convertidor electromecánico rotativo que en virtud de los fenómenos de inducción y de par electromagnético transforma la energía mecánica en energía eléctrica. Si la corriente generada es continua estaremos ante un generador de corriente continua, también designado corrientemente por dinamo. Si transforma la energía eléctrica, continua, en energía mecánica hablaremos de un motor de corriente continua.

Las máquinas de corriente continua tiene un carácter reversible, es decir, pueden funcionar como motor, si se alimentan las bobinas del rotor con corriente continua, o como dinamo, si se les aplica una energía mecánica que provoque el giro del rotor.

## 2. CLASIFICACIÓN DE LA MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE CC

Las máquinas de CC se clasifican en dos grandes grupos: generadores y motores.

### - Generadores de CC:

- \* Dinamo.
- \* Excitación independiente.
- \* Autoexcitados.
- \* Excitación serie.
- \* Excitación paralelo.
- \* Excitación compuesta.
- \* Pila.
- \* Acumulador.
- \* Panel solar.

### - Motores de CC

- \* Excitación independiente.
- \* Autoexcitados
- \* Excitación serie.
- \* Excitación paralelo.
- \* Excitación compuesta.

## 3. CONSTITUCIÓN Y CONCEPTOS PREVIOS.

### 3.1 Constitución.

El **estator** esta formado por una corona de material ferromagnético, fundición de acero magnético o tubo de hierro, denominado culata o yugo, en cuyo interior, regularmente distribuidos y en numero par, van dispuestos unos salientes radiales de hierro macizo o de plancha de hierro dulce de 1mm de espesor, troquelada y apilada con una expansión en su extremo, denominados polos, sujetos por tornillos a la carcasa. Alrededor de los polos se hallan unas bobinas de hilo de cobre, o de pletina de cobre asilado, con la misión de al ser alimentada por corriente continua, de crear un campo magnético inductor de la máquina, el cual presenta alternativamente polaridades norte y sur. El eje de estos polos es llamado eje longitudinal o eje directo, en tanto que el eje geométrico de simetría entre polos de opuesta polaridad, o sea el eje que forma un ángulo 90° eléctricos con el eje directo, es llamado eje transversal.

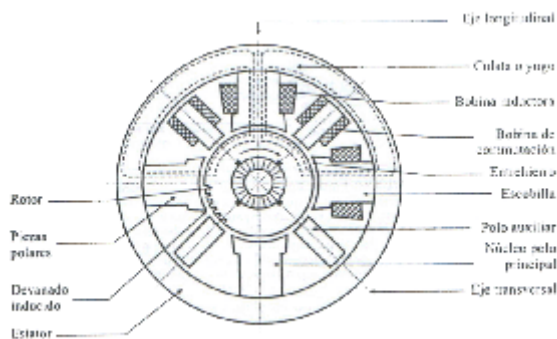


Figura 1. Constitución de la máquina de corriente continua. Sección transversal.

El **rotor** está formado por una corona de material ferromagnético, a base de chapas de hierro con un débil contenido de silicio de 0,5 mm de espesor, aisladas unas de otras por una capa de barniz o de óxido. Está corona v calada directamente sobre el eje de giro, en las máquinas de limitada potencia, o sobre una linterna de fundición de hierro o de plancha de hierro soldada fijada al eje.

El **colector de delgas** se encuentra fijado al eje, el cual contendrá tantas delgas como bobinas simples presenta el devanado. Cada delga va unida

eléctricamente al punto de conexión de una bobina con otra del devanado. La misión del colector es la de convertidor de frecuencia.

Las **escobillas y el collar porta escobillas**, constituido por un aro de fundición de hierro u otro material estructural metálico, al cual van sujetas interposición de un aislante apropiado las cajas

portaescobillas de bronce o de latón que retienen las escobillas que establecerán el enlace eléctrico entre las delgas del colector y el circuito de corriente continua exterior.

### 3.2 Principio de funcionamiento.

#### a) Funcionamiento como generador de corriente continua.

Cuando hacemos girar el inducido (funcionamiento de la máquina como generador) los conductores del devanado cortarán las líneas de inducción del campo y en virtud del campo de inducción se nos indicará en cada uno de ellos una f.e.m cuya variación en el tiempo, supuesta una velocidad de giro constante, será proporcional a la inducción y cuya distribución en el espacio, a una escala determinada, coincidirá con la de inducción.

$$e = B \cdot l \cdot v \text{ (voltios)}$$

La variación de f.e.m en el tiempo ( $e=f(t)$ ) responderá a una curva de onda alternativa, cuya frecuencia de rotación "fr" será igual a  $fr=pn/60$  (Hz). Siendo p los pares de polos y n el número de vueltas.

Si el desplazamiento lineal, representado por la velocidad v, lo convertimos en deslizamiento circular con velocidad angular  $\omega$  ( $v=\omega r$ ), estamos representando el caso de conductores alojados en las ranuras del inducido que giran a una velocidad angular  $\omega$  en el seno del campo magnético inductor de la máquina rotativa. El valor eficaz de la f.e.m inducida por un conductor es:

$$E = 2,22 \cdot f \cdot \Phi_{\max}$$

#### b) Funcionamiento como motor de corriente continua.

Para el funcionamiento como motor, excitaremos el campo magnético inductor y con la máquina en reposo, aplicaremos una tensión continua a las escobillas. Esta tensión determinará la circulación por cada rama del devanado inducido de una corriente que bajo la acción del campo magnético dará origen en cada bobina a una fuerza electromagnética. La inversión de polaridad del campo magnético, en coincidencia con la inversión del sentido tangencial. Cuando el par de todas las fuerzas generadas en los conductores superan el par resistente aplicado por el motor, éste girará.

La posición fija de las escobillas hace que los sentidos de la corriente en las bobinas sean fijos, cambiando al pasar cada bobina de un lado al otro de las bobinas sean fijos, cambiando al pasar cada bobina de un lado al otro de las líneas de escobillas.

Cuando un motor de corriente continua se invierte la polaridad de los conductores generales de alimentación, no cambia el sentido de giro, porque la inversión afecta al inducido y al inductor, y por lo tanto, el sentido de giro permanece invariable. Para invertir el sentido de giro sólo debe invertirse la corriente en el inductor o en el inducido.

El sentido de giro se determina por la regla de la mano izquierda, una vez conocidos los sentidos de la corriente en la excitación y en el inducido.

#### C) La fuerza contraelectromotriz.

Si gira el inducido en el campo polar, en sus conductores, al igual que un generador, se induce una f.e.m cuyo sentido se puede determinar por la regla de la mano derecha. Este sentido resulta ser contrario a la tensión aplicada, por lo que se denomina fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m). Para una máquina dada, y para un campo invariable, esta f.c.e.m sólo dependerá de la velocidad de rotación; es nula en el arranque (estado de reposo), alcanzando en vacío su valor máximo y disminuyendo a medida que la carga aumenta.

### 3.3 Devanados de los inducidos.

Los devanados de inducido de las máquinas de corriente continua están empleados en el rotor y son cerrados, de doble capa, imbricados u ondulados, con las uniones entre bobinas simples conectadas a una delga. Por tanto, el colector tendrá tantas delgas como bobinas elementales haya.

### 3.4 Sistemas de excitación.

Según la fuente de alimentación de las bobinas inductoras, se distinguen dos tipos de excitación:

- Excitación independiente.
- Autoexcitación.

La autoexcitación, como su propio nombre da a entender, significa que la corriente continua que excita las bobinas inductoras procede de la misma máquina generatriz.

#### 3.4.1 Excitación independiente.

La excitación independiente significa que la fuente de alimentación del devanado inductor es ajena a la propia máquina, es decir, que la corriente continua que alimenta el devanado inductor procede de una fuente independiente, la cual puede ser una batería de acumuladores, un rectificador conectado a una red alterna o bien otro generador de corriente continua rotativo. En este último caso, si el generador va montado sobre el propio eje de la máquina, la excitación independiente se distingue con el nombre de excitación propia.

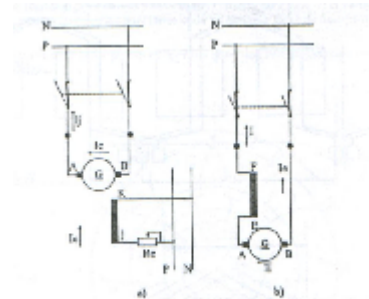
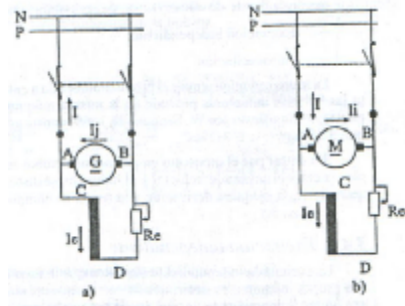


Figura 8. Conexiones de los circuitos de excitación de las máquinas de corriente continua. a) Excitación independiente. b) Autoexcitación serie.

#### 3.4.2 Excitación serie.

En la máquina serie el devanado inductor está conectado en serie con el inducido y por consiguiente la totalidad de la corriente que circula por el inducido pasa por el inductor, de forma que la corriente del inducido ( $I_i$ ) es igual a la de excitación ( $I_e$ ), a la de la carga ( $I$ ) o corriente suministrada al circuito externo.



#### 3.4.3 Máquina derivación.

En la máquina de derivación el devanado inductor viene conectado directamente a las escobillas y en consecuencia eléctricamente está en paralelo o derivación con el inductor se coloca una resistencia variable (reóstato)  $R_e$  con la misión de regular entre ciertos límites la corriente de excitación.

#### 3.4.4 Excitación compuesta.

En la máquina de excitación compuesta, el devanado inductor consta de dos tipos de bobinas, unas de sección relativamente gruesa en serie con el devanado inducido y recorridas por tanto por toda la corriente de la máquina y otras de hilo fino y elevado número de espiras conectadas a los bornes de salida, es decir, en paralelo con el sistema inducido-inductor serie. A esta conexión se le denomina larga. Si la conexión se realiza directamente a las escobillas quemando el devanado serie alimentado por la corriente de carga se denomina compuesta corta.

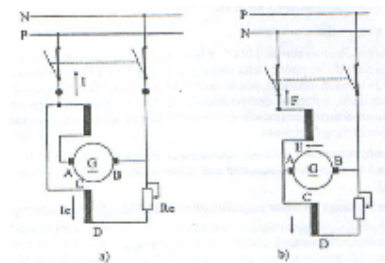


Figura 10. Conexiones de la máquina excitación compuesta. a) Compuesta larga. b) Compuesta corta.

### 3.5 F.e.m inducida en la máquina de CC.

La tensión entre las escobillas de distinta polaridad en un instante dado será la suma de las f.e.m inducidas en todas las bobinas que están conectadas en serie en un circuito derivado del devanado y el valor medio de esta tensión vendrá dado por el valor medio de la f.e.m inducida en una espira por el número de espiras que comprende un circuito derivado.

La velocidad del inducido  $v$  es

$$V = \pi \cdot D \cdot \frac{n}{60} = 2p \cdot t_p \cdot \frac{n}{60}$$

La f.e.m inducida es

$$E = C_1 \cdot n \cdot \Phi_1 \text{ tal que } C_1 = \frac{p}{a} \cdot \frac{N'}{2\pi 60} \text{ y } \Phi = \Phi_M$$

### 3.6 Relación de inducido y su compensación.

Un punto muy importante al determinar la diferencia tener la f.e.m inducida y la tensión en bornes de la máquina, aparte de la influencia de la resistencia propia del devanado inducido, es el hecho que la corriente que circula por este devanado determina una fuerza magneto motriz (f.m.m) la cual, de actuar sola, crea a su vez un campo magnético y al actuar conjuntamente con la f.m.m del inductor, da lugar simultáneamente a una modificación de la forma de la onda de inducción en el entrehierro y una reducción del flujo útil por polo. Este efecto se conoce con el nombre de reacción de inducido.

Dos son las causas que fundamentalmente pueden distinguirse como determinantes de esta diferencia:

- La caída de tensión debida a la resistencia del devanado inducido y a la resistencia de contacto de las escobillas con las delgas.

- La f.m.m producida por las bobinas del inducido al ser recorridas por la corriente de carga, que da origen a la llamada reacción magnética del inducido.

Existen soluciones que aminoran la importancia de la reacción transversal del inducido o incluso la anulan:

- a) Reducir, por diversos medios de tipo mecánico, la deformación de la inducción en el entrehierro.
- b) Devanados de compensación.
- c) Decalado de las escobillas.
- d) Polos de conmutación.

### 3.7 El fenómeno de la conmutación.

Cada vez que las dos delgas de los extremos de una bobina tocan una misma escobilla o dos de igual polaridad, la bobina es puesta en cortocircuito. Es justamente durante el tiempo que la bobina está en cortocircuito cuando tiene lugar la conmutación inversión del sentido de la corriente que pasa por ella.

Una de las exigencias para tener una conmutación sin chispas es eliminar y mantener constante la densidad de corriente, impidiendo que alcance valores exagerados entre cualquier punto de contacto entre delga y escobilla, y para ello los dos métodos recomendados son:

- Decalado de las escobillas, con relación a la línea neutra.
- Los polos de conmutación.

#### 3.7.1 Decalado de las escobillas

Desplazando las escobillas sobre el colector en el sentido de giro, si es un generador o en el sentido opuesto al giro en un motor, más allá de la línea neutra magnética, situaremos las bobinas en conmutación en un campo de polaridad opuesta a la anterior, invirtiéndose el sentido de la f.e.m de rotación (ec), y favoreciendo así la conmutación de la corriente.

Si escogemos convenientemente la posición de las escobillas podremos conseguir, para una determinada carga de la máquina, que esta f.e.m ec, equilibre a las de autoinducción y la sumas de las f.e.m de inducción mutua  $e_L + \sum e_M$ . Pudiendo alcanzar, de esta forma, una conmutación correcta.

#### 3.7.2 Polos de conmutación

El método generalmente empleado de forma invertebrada para evitar en lo posible el problema de la conmutación, en casi todas las máquinas de corriente continua, es crear en las zonas de conmutación del inducido, o sea en las superficies del inducido que cubren los lados activos de las bobinas cortocircuitadas por las escobillas, dispuestas en la línea neutra geométrica, un campo magnético de inducción y polaridad apropiados para que induzca en las bobinas cortocircuitadas la f.e.m de rotación que precisamos. Este campo se consigue fácilmente disponiendo en el estator de la máxima, entre los polos inductores unos

polos, de menores dimensiones, a los que se da el nombre de polos de conmutación o auxiliares, cuyos ejes coinciden con los transversales o ejes neutros geométricos; la longitud axial de los polos de conmutación es igual o ligeramente inferior a la de los polos principales.

#### 4. GENERADORES DE CORRIENTE CONTINUA.

##### 4.1 Generadores de excitación independiente.

La corriente continua necesaria para provocar la excitación puede obtenerse de una fuente exterior (excitación independiente) o bien de la misma corriente que genera (autoexcitación).

Las bobinas de los polos se conectan en serie, de manera que un polo norte sigue siempre un polo sur.

Para su alimentación se utiliza una fuente de tensión continua sensiblemente constante (batería de acumuladores, corriente alterna rectificada, generador autoexcitado, etc). Si empleamos un reóstato de regulación, denominado regulador de campo, puede variarse la f.e.m del generador modificando la corriente de excitación del campo.

##### 4.2 Generador de excitación derivación.

Su circuito de conexiones es el indicado en la figura. El reóstato intercalado en el circuito derivación sirve para modificar la corriente de excitación de la máquina y la f.e.m.  $E$  inducida. En esta máquina, una parte de la corriente que cede el inducido  $I_i$ , por lo general de un 0'5 a un 5% de su valor, según la potencia de la máquina, es absorbida por el propio circuito de excitación.

Por el elevado número de espiras del devanado de excitación, con una pequeña intensidad de excitación se obtiene un campo magnético de gran intensidad.

##### 4.3 Generador de excitación serie.

En esta conexión los devanados de excitación e inducido están dispuestos en serie, por tanto, la intensidad de carga es la intensidad de excitación.

##### 4.4 Generador de excitación compuesta.

El devanado consta de dos bobinas, que se conectan: una serie con el inducido (devanado serie) y otra en paralelo con el (devanado shunt).

Existen dos tipos de conexión según se dispongan los devanados, lo que nos lleva a dos tipos de máquinas de excitación compuesta. En la fig se observan las diferencias.

La diferencia entre estos dos montajes tiene poca importancia práctica, por causa de la pequeña caída de tensión en el devanado serie (de conductor grueso y pocas espiras) y apenas influye en las características funcionales de la máquina.

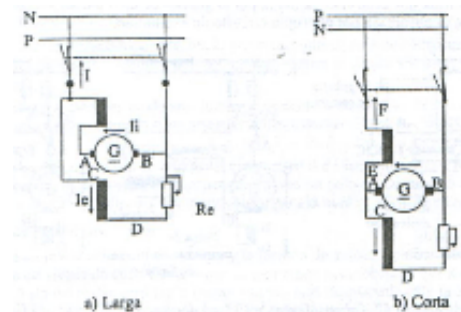


Figura 19. Conexiones de la excitación compuesta corta y larga.

##### 4.5 Aplicaciones

Las dinamos de derivación se emplean en instalaciones de alimentación de corriente continua, especialmente cuando se conectan en paralelo baterías de acumuladores, ya que en caso de inversión no varía en sentido de la corriente del devanado de excitación y no se invierte la polaridad de la dinamo.

Como las dinamos en serie tienen la tensión muy dependiente de la carga y se invierte su polaridad en los retrocesos de corriente, apenas si se emplean como generador; no obstante, los motores serie, muy empleados en extracción, se utilizan como generadores para frenar el vehículo. La potencia generada no se devuelve a la red de alimentación, sino que se descarga sobre resistencias, convirtiéndose en calor, que en invierno se aprovecha para calentar el coche.

La dinamos compound se emplean para suministrar corriente continua cuando no se utilizan acumuladores. La instalación de dos dinamos compound en paralelo, debido a las inversiones del devanado serie, solo es posible empleando conductor de compensación. La dinamos hipocompound o (compound diferencial) se utilizan en tipos especiales, como generadores para soldadura.

## **5.MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA**

### **5.1 Motor de excitación derivación.**

En esta conexión el devanado de excitación se conecta a la red; por ello su excitación es independiente de la carga. En vacío determina un valor de la velocidad, la cual disminuye en servicio a causa de la carga y debido a la disminución de la f.c.e.m.

En este caso la disminución de la velocidad debida a la reacción del inducido es pequeña. Como la resistencia del devanado de excitación es elevada, la intensidad de excitación será pequeña (aproximadamente 5% de la intensidad nominal), permitiendo una regulación de la velocidad mediante reóstato, sin pérdidas hasta en relación 1:3. Es posible también reducir la velocidad si colocamos un reóstato en serie con el devanado del inducido; pero ello resulta antieconómico, debido al consumo de energía.

### **5.2 Motor de excitación serie.**

En los motores serie la intensidad del inducido es al propio tiempo la excitación; por ello la velocidad depende de la carga.

En vacío la velocidad crecería sin límite debido a la ausencia de excitación. En consecuencia, los motores serie no pueden trabajar en vacío, o bien deben instalarse volantes de carga.

En servicio cae rápidamente la velocidad debido a la carga, por la mayor caída de tensión en el inducido y por el aumento de la intensidad de excitación. Para la regulación de velocidad se emplea un reóstato en serie con el inducido, el cual la disminuye.

### **5.3 Motor de excitación compuesta.**

Al igual que ocurre con los motores con conexión en derivación, en estos motores el devanado paralelo limita la velocidad máxima. Cuando los dos devanados de excitación se conectan con igual signo, la velocidad cae rápidamente en carga, debido al incremento del campo en la excitación al crecer la carga.

### **5.4 Arranque**

En el momento de conectar el motor la f.c.e.m es nula; como la resistencia  $R_a$  es muy pequeña, la tensión  $U$  da lugar a una elevada intensidad de corriente,

$$I_a = U/R_a$$

Para limitar esta, en potencias mayores de 500W se coloca un reóstato de arranque. Este debe ser una elevada resistencia en el momento de arranque y se la va reduciendo a medida que el motor se acelera y crece la f.c.e.m. Si el reóstato se ha previsto para trabajo continuo, se puede utilizar como regulador de velocidad.

### **5.5 Regulación de velocidad**

Los motores de corriente continua no tiene una velocidad fija, sino que esta se puede regular, contrariamente a los motores de inducción de campo giratorio en los que ello no es posible. La velocidad depende del equilibrio entre la tensión en bornes, por un lado y la f.c.e.m junto con la caída de tensión, por otro.

Las modificaciones de la velocidad (rev/min) de los motores de corriente continua se pueden obtener mediante los siguientes procedimientos:

- Debilitando el campo de excitación (aumenta la velocidad)
- Aumentando la tensión en bornes (aumenta la velocidad).

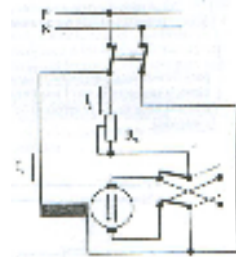
- Intensificando el campo de excitación (aumenta la velocidad)
- Reduciendo la tensión en bornes (aumenta la velocidad)

El sistema de **regulación por resistencia** es el mas simple y fácil de aplicar a cualquier tipo de motor en cualquiera de sus conexiones: serie, derivación y compuesto. Se puede llegar a utilizar el mismo reóstato de arranque del motor, si bien en caso de ser utilizado también como reóstato de regulación deberá cuidarse la refrigeración.

La regulación de la velocidad **mediante el control de la tensión** del inducido es un buen sistema, pero requiere disponer de un equipo que posibilite una tensión continua regulable. Si el sistema permite una regulación desde cero hasta la tensión nominal, podremos eliminar el reóstato de arranque para la puesta en marcha, así como dispondremos de un margen de regulación de velocidad completo: desde cero a su valor nominal.

### 5.6 Inversión de giro.

El procedimiento más usual es actuar sobre el inducido ayudándonos del reóstato de arranque, puesto que un cambio brusco de giro supone un incremento muy fuerte de la corriente absorbida por el inducido y un golpe de corriente en la red, lo cual es peligroso. Además se produce un fuerte par y un violento choque mecánico en la máquina y un fuerte choque térmico en el devanado inducido que podría dañarlo. Por el fenómeno de la conmutación tendríamos también grandes chipas en las escobillas, con peligro de fuerte arco eléctrico. En el colector.



### 5.7 Aplicaciones

#### a) Motor con conexión derivación

Para sus características de velocidad y par se emplea en las máquinas herramientas, que requieren una velocidad constante independientemente de la carga a la que estén sometidas.

#### b) Motor con conexión en serie

Dado que el motor de conexión serie posee un gran par de arranque, posee el mayor incremento de par motor para un incremento dado de corriente y su velocidad varia con la carga, es el tipo más conveniente para los tranvías, trolebuses o locomotoras.

#### c) Motores con conexión compuesta.

En general es un tipo de motor que presenta una característica intermedia entre un motor serie y el motor en derivación, lo que le permite una aplicación general si no es imprescindible una velocidad constante.

## 6. MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA ESPECIALES.

### 6.1 Máquina acíclica.

Esta máquina está basada en el principio de que si hacemos girar sobre su eje a velocidad angular constante un disco metálico en la influencia de un campo magnético de un imán o un electroimán, en cada uno de los radios elementales del disco se inducirá una fuerza electromotriz constante, la cual la podemos recoger mediante dos escobillas situadas en el eje de giro y en el elemento exterior del disco.

Máquinas basadas en este principio son la máquina de Faraday, la rueda de Barlow o la dinamo de Poirson.

### 6.2 Dinamo de Rosemberg.

La dinamo de Rosemberg es una máquina que se aprovecha este fenómeno de la reacción de inducido. Esta energía es aprovechada por la propia alimentación del circuito de excitación de la máquina. Una característica constructiva de esta dinamo es que las escobillas tradicionales situadas en el eje transversal de la máquina están puestas en cortocircuito.

Una aplicación característica de esta dinamo es en la iluminación de trenes accionados por los propios ejes de la rueda, mediante transmisión por correa conectada a una batería de acumuladores.

### **6.3 Metadinamos.**

Son máquinas convertidoras de energía a tensión constante en una situación de corriente eléctrica constante. La función del motor de arrastre se limita a suplir las pérdidas mecánicas por rozamiento y las pérdidas en el hierro de su inducido.

### **6.4 Servomotores.**

La aplicación del motor de corriente continua como servomotor es la utilización del motor en la última etapa de la cadena directa de un servomecanismo de accionamiento o posición, y por lo tanto , aporta la energía que precisa la carga bajo forma mecánica.

La máquina eléctrica de corriente continua utilizada como servomotor requiere las siguientes características:

- a) Reducido factor de inercia.
- b) Buen sistema de aislamiento térmico.
- c) Un sistema de conmutación de gran perfección.
- d) La calidad de las escobillas.
- e) Sistema de ventilación independiente.
- f) Precisión mecánica en su construcción.

### **6.5 Dinamo tacométrica.**

Las dinamos tacométricas o taquimétricas están diseñadas para dar una respuesta de su tensión en bornes directamente proporcional al número de sus revoluciones, independientemente del sentido de giro y de la aceleración.

### **6.6 Otras máquinas especiales.**

- **Motor con rotor bobinado inducida impreso.** Es un tipo de motor con aplicaciones en servomecanismos de posición y de mando, para el accionamiento de enrolladores y desenrolladores, dinamos tacométricas, etc. Es un motor con forma de disco, compuesto de tres discos: inductor, inducido y culata.

- **Rolotrol.** Es el equivalente a la amplidina en las máquinas de corriente continua. Es una máquina amplificadora de potencia y reguladora automática. Posee excitación serie no saturada, a la cual, mediante el ajuste de la resistencia del circuito exterior se le hace trabajar sobre la parte rectilínea de su característica exterior.

- **Amplificadores dinámicos.**